



Artigo submetido ao Curso de Engenharia Civil da UNESC  
como requisito parcial para obtenção do Título de  
Engenheiro Civil



## Estabilização granulométrica de solo argiloso com agregado de resíduo de concreto da construção civil para utilização em pavimentação

Ana Paula Gava Niehues (1), Luiz Renato Steiner(2)

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense

(1) [anapaula\\_gn@hotmail.com](mailto:anapaula_gn@hotmail.com), (2) [luizsteiner@unesc.net](mailto:luizsteiner@unesc.net)

**Resumo:** As obras de pavimentação normalmente consomem grandes volumes de recursos naturais para execução das camadas constituintes, fator que provoca grandes impactos ambientais necessitando, portanto, da busca por alternativas que modifiquem esse cenário. Atualmente muitos materiais têm sido estudados como forma de suprir a utilização destes recursos, e os agregados de resíduo de concreto (ARC) têm se mostrado promissores nesse contexto. O presente trabalho teve como objetivo avaliar a estabilização granulométrica com adição de ARC a um solo argiloso da Formação Geológica Palermo para utilização em camadas de pavimentos de obras rodoviárias. Os agregados utilizados foram divididos em duas faixas granulométricas, resultantes dos processos de trituração em britador de mandíbula e de impacto, sendo um com frações menores que 9,5mm e outro com frações menores que 25,4mm, denominados ARC-FINO e ARC-GROSSO, respectivamente. Foram realizadas misturas de solo com 30, 50 e 70% de cada ARC, totalizando seis combinações, e ensaios físicos de granulometria, limite de liquidez e limite de plasticidade para os materiais puros e para as misturas, os quais permitiram classificar os mesmos pelo sistema *Highway Research Board*, sendo o solo considerado como A 7-5, o ARC-FINO como A 1-b e ARC-GROSSO como a 1-a. As combinações de solo e ARC, bem como o solo natural, foram submetidas aos ensaios mecânicos de compactação e Índice de Suporte Califórnia (CBR) com submersão por 96 horas nas energias de compactação Proctor Normal (PN) e Proctor Modificada (PM). As misturas que apresentaram valores de expansão menores que 2% e CBR maiores que 2%, conforme requisitos do DNIT, com exceção do solo natural, do ARC F 30 compactado em PN, e do ARC G 30, 50 e 70 compactado em PM, foram consideradas aptas para utilização como camada de subleito. A mistura ARC F 70 compactada em PM foi a que apresentou melhores resultados, com expansão de 0,11% e CBR de 52,33%, podendo ser utilizada como camada de sub-base ou reforço. Diante dos resultados concluiu-se que o ARC é viável para estabilização de solo argiloso e como alternativa para destinação dos resíduos provenientes da construção civil, os quais representam cerca de 50% dos resíduos sólidos produzidos no Brasil.

**Palavras-chave:** Solo argiloso; Estabilização granulométrica; Agregado de resíduo de concreto; Pavimentação.

**Granulometric stabilization of clayey soil with aggregate of concrete waste from civil construction for use in paving**

**Abstract:** Paving works normally waste large volumes of natural resources for the execution of the constituent layers, a factor that causes wide environmental impacts, needing, therefore, the search for alternatives that modify this scenario. Currently many materials has been studied as a way of supplying the use of these resources, and the aggregates of concrete residue (ARC) have shown to be promising in this context. The present work had as objective to evaluate the granulometric stabilization with addition of ARC to a clay soil of the Palermo Geological Formation for use in layers of pavements of road works. The aggregates used was divided into two grids resulting from crushing processes in jaw and impact crusher, one with fractions smaller than 9.5 mm and one with fractions smaller than 25.4 mm, called ARC-FINO and ARC-GROSSO respectively. Soil mixtures were made out with 30, 50 and 70% of each ARC, totaling six combinations, and physical tests of granulometry, liquid limit and plastic limit for the pure materials and for the mixtures, which allowed to classify them by the system HRB, the soil being considered as A 7-5, ARC-FINO as A 1 -b and ARC-GROSSO as 1-a. Soil and ARC combinations, as well as natural soil, were subjected to mechanical compaction tests and California Bearing Ratio (CBR) with submergence for 96 hours in the Normal Proctor (PN) and Modified Proctor (PM) compaction energies. The mixtures presented expansion values lower than 2% and CBR higher than 2%, according to DNIT requirements, with the exception of natural soil, ARC F 30 compacted in PN, and ARC G 30, 50 and 70 compacted in PM, were considered suitable for use as subgrade layer. The ARC F 70 blend compacted in PM presents the best results, with expansion of 0.16% and CBR of 52.31%, which could be used as a sub-base or reinforcement layer. In view of the results, it was concluded that ARC is feasible for stabilization of clay soil and as an alternative for the disposal of waste from construction, which represents about 50% of the solid waste produced in Brazil.

**Keywords:** Clay soil; Granulometric stabilization; Aggregate of concrete residue; Paving.

## Introdução

A execução de pavimentos em obras rodoviárias incorre muitas vezes da necessidade de substituição, reforço ou estabilização do solo natural de fundação devido suas características impróprias para o uso a que se destina. A substituição ou reforço do solo natural, exige grandes quantidades de recursos naturais explorados de jazidas de empréstimo, a disponibilidade destes materiais, o alto volume de material transportado bem como a distância de transporte até do local da obra, são fatores que geram grandes custos e impactos ambientais. A estabilização do solo, por sua vez, consiste na melhoria das propriedades geotécnicas do solo natural por meio de misturas com outros materiais, com o intuito de fortalecer a superfície a ser pavimentada (FIROOZI et al., 2017). Dentre os tipos de estabilização de solos encontra-se a estabilização granulométrica, que é o “processo de melhoria da capacidade resistente de materiais *in natura* ou mistura de materiais” por meio da aplicação de energia de compactação adequada de forma

a garantir durabilidade e estabilidade ao produto final (DNIT, 2010 p. 2). Assim, a estabilização do solo pode ser um procedimento muitas vezes mais econômico que a sua substituição.

Muitos materiais têm sido estudados para serem inseridos como agentes estabilizantes, que melhorem as características geotécnicas de solos e, conjuntamente, os agregados de resíduos sólidos, provenientes da indústria da construção civil têm se mostrado como materiais promissores para uso em camadas de pavimentos. Estes materiais possuem, inclusive, normatização própria para tal finalidade, a NBR 15115 e 15116/2004, podendo ser divididos em duas classificações: Agregado de Resíduo Misto (ARM) e Agregado de Resíduo de Concreto (ARC). Grubba (2009) afirma com base em seu estudo do comportamento mecânico do ARC, que o mesmo pode ser usado como camada de base e sub-base de pavimentos.

A indústria da construção civil cresceu muito ao longo dos últimos anos e apesar de ser um dos setores mais importantes para o desenvolvimento econômico e social do país, é também o setor que mais utiliza matérias-primas naturais e não renováveis sendo, portanto, o maior gerador de resíduos (CBIC, 2015). Conforme estudo realizado por Cardoso, Galatto e Guadagnin (2014), a estimativa de geração de Resíduos da Construção Civil (RCC) na cidade de Criciúma (SC), entre os anos de 2001 a 2010, foi de 145,65 t/dia, sendo que no Brasil, os impactos causados na geração destes resíduos são agravados pelo descarte irregular. De acordo com o IPEA (2012, p.10) os RCCs “são vistos como resíduos de baixa periculosidade, sendo o impacto causado, principalmente, pelo grande volume gerado” e “podem representar de 50% a 70% da massa dos resíduos sólidos urbanos – RSUs”. Leite (2007, p. 2) afirma que o Resíduo de Construção e Demolição (RCD) “é um material nobre do ponto de vista da engenharia, pois normalmente se apresenta resistente e com baixa expansão”. De acordo com Grubba (2001 apud CARNEIRO et al., 2009) os RCDs são compostos em 53% de Concreto e Argamassa, seguindo de solo e areia com 22%, cerâmica com 14%, rocha 5%, plástico 4% e outros com 2%.

Diante o exposto, busca-se com o desenvolvimento desta pesquisa avaliar a estabilização granulométrica de um solo argiloso, proveniente da Formação Geológica Palermo, por meio da adição de agregado de resíduo de concreto da construção civil (ARC), para utilização em pavimentação. A estabilização com adição deste resíduo visa melhorar a capacidade de suporte do solo natural, de forma a atender as especificações mínimas para materiais destinados a camadas de pavimentos, promovendo, assim, a atenuação dos impactos ambientais causados pela exploração de recursos naturais, por meio da destinação nobre para os resíduos de concreto provenientes da construção e demolição de obras civis.

## Materiais e métodos

Para realização do estudo foi utilizado um solo argiloso proveniente da Formação Geológica Palermo, sendo que este tipo de solo normalmente apresenta elevada expansão e baixa capacidade de suporte para utilização em camadas de pavimentos. “A Formação Palermo é representada predominantemente por folhelhos siltico argilosos, tendendo formar solos tipo, silte argilosos e argilas siltosas, com coloração variando entre o cinza, o amarelo e o roxo (BRESCIANI, 2009 p.68). As amostras de solo foram coletadas no Parque Científico e Tecnológico (IPARQUE) da Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), coordenadas 28°43'53.5"S 49°24'22.1"W. O solo coletado foi previamente preparado para os ensaios, por meio dos procedimentos de secagem em estufa, destorroamento e peneiramento em conformidade com a NBR 6457/2016.

Os resíduos de concreto foram coletados de diversas obras da região de Criciúma/SC. Este tipo de resíduo, geralmente é considerado como inerte, pertencendo a Classe II-B da NBR 10004/2004 e, também se enquadra na classe A da resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 307/2002. No contexto em que foi utilizado neste estudo, o resíduo é considerado como reciclado, uma vez que o mesmo passou por processo de beneficiamento para transformá-lo em agregado de resíduo de concreto (ARC), possibilitando a fragmentação do material de grandes dimensões e reduzindo-os para os processos seguintes.

Os ARCs foram divididos em dois grupos, um com uma granulometria fina e outro com uma granulometria mais grossa, tais amostras foram denominadas ARC-FINO e ARC-GROSSO, respectivamente. O ARC-FINO foi obtido pelo processo de britagem do resíduo em dois estágios, primeiramente a fragmentação se deu em um britador de mandíbula com abertura da passagem de 1” e no segundo a fragmentação se deu em um britador por impacto com abertura da passagem do britador de 4,80 mm, para enquadramento do resíduo como areia. Já para obtenção do ARC-GROSSO, o resíduo foi processado somente no britador de mandíbula com abertura da passagem com 1”, obtendo-se partículas de agregados menores que 25,40 mm.

Optou-se por utilizar duas granulometrias diferentes para verificar se as dimensões das partículas dos agregados provocariam resultados diferentes para expansão e CBR. A Figura 1 ilustra os materiais utilizados, sendo (a) solo preparado (b) ARC-FINO (c) ARC-GROSSO.

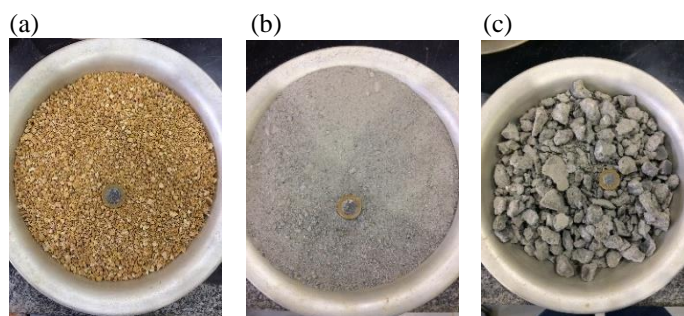


Figura 1. Materiais utilizados no estudo: (a) solo preparado (b) ARC-FINO (c) ARC-GROSSO

Após a preparação dos materiais foram realizadas seis combinações de solo com os agregados. Tais percentuais foram determinados com base em outros estudos que utilizaram material com características granulares. Foram feitas três misturas de solo com ARC-FINO e três misturas de solo com ARC-GROSSO, sendo estas combinações mostradas na Tabela 1.

Tabela 1. Misturas dos materiais

| Denominação<br>Mistura | Material |                 | Denominação<br>Mistura | Material |                   |
|------------------------|----------|-----------------|------------------------|----------|-------------------|
|                        | Solo (%) | ARC-FINO<br>(%) |                        | Solo     | ARC-GROSSO<br>(%) |
| SOLO 100               | 100      | 0               | SOLO 100               | 100      | 0                 |
| ARC F 30               | 70       | 30              | ARC G 30               | 70       | 30                |
| ARC F 50               | 50       | 50              | ARC G 50               | 50       | 50                |
| ARC F 70               | 30       | 70              | ARC G 70               | 30       | 70                |

Os percentuais correspondem ao peso seco da quantidade necessária de material para realização dos ensaios de compactação e de caracterização conforme NBR 6457/2016. A amostra de solo natural foi mantida como referência para comparação dos resultados.

Inicialmente foram realizados ensaios físicos de granulometria, limite de liquidez e limite de plasticidade para caracterização dos materiais puros e das misturas. Posteriormente, o solo natural e as misturas de solo e ARC foram submetidas aos ensaios mecânicos de compactação, expansão e Índice de Suporte Califórnia (CBR). Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) no Parque Científico e Tecnológico (IPARQUE) da Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC). Os ensaios seguiram as recomendações de suas respectivas normas, a saber:

- ✓ Granulometria - NBR 7181/2016;
- ✓ Limite de Liquidez (LL) - NBR 6459/2016;
- ✓ Limite de Plasticidade (LP) - NBR 7180/2016;
- ✓ Compactação - NBR 7182/2016;
- ✓ Expansão e Índice de Suporte Califórnia (CBR) - NBR 9895/2016.



Os ensaios físicos permitiram avaliar as frações de solo de cada material, bem como classificá-los conforme o sistema *Highway Research Board* (HRB). Os ensaios mecânicos, por sua vez, determinaram o teor de umidade ótima para compactação, a máxima densidade seca, a expansão e o Índice de Suporte Califórnia (CBR), por meio de aplicação de uma energia de compactação. Neste estudo os corpos de prova foram moldados na energia Proctor Normal (PN) e Proctor Modificada (PM) em conformidade com a NBR 7182/2016. A Figura 2 apresenta o fluxograma com os procedimentos realizados neste estudo.

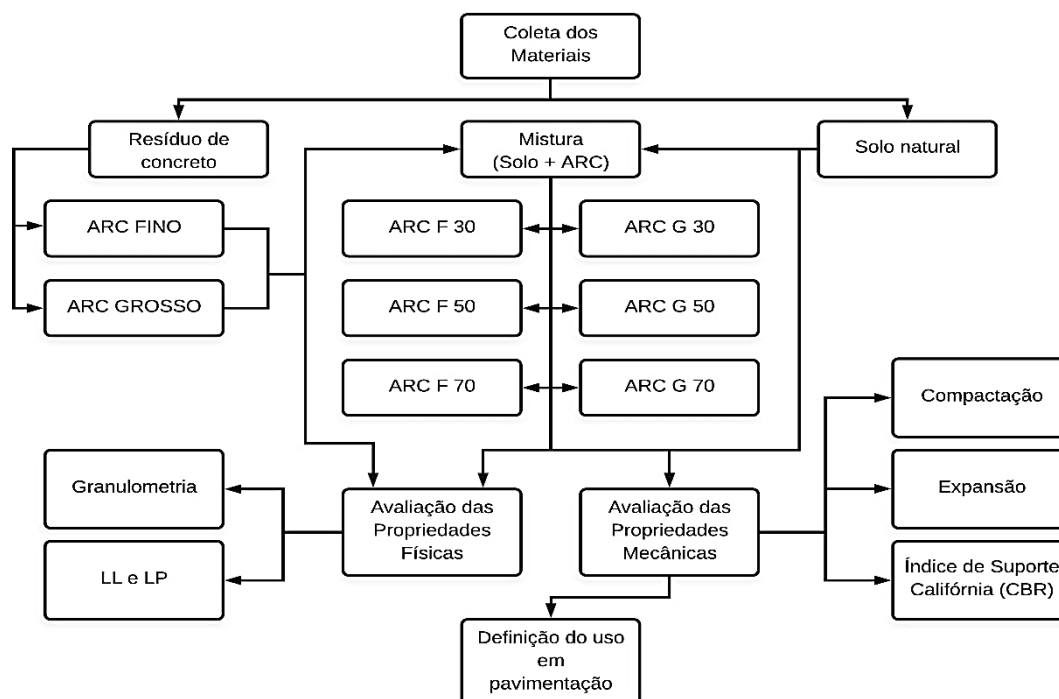


Figura 2. Fluxograma das etapas realizadas no estudo

Após o ensaio de CBR, as misturas de solo e ARC foram novamente submetidas ao ensaio de granulometria para verificar se houve alteração no tamanho das partículas. A partir dos resultados de expansão e CBR das misturas, foi possível verificar se os mesmos atenderam aos requisitos das normas do DNIT para utilização em camadas de pavimentos.

## Resultados e discussões

Os resultados dos ensaios de limite de liquidez, limite de plasticidade e análise granulométrica, permitiram classificar os materiais puros pelo sistema HRB. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 2. Caracterização física dos materiais puros

| Material   | LL % | LP % | IP % | IG | HRB  |
|------------|------|------|------|----|------|
| Solo       | 61   | 40   | 21   | 17 | A7-5 |
| ARC-FINO   | NL   | NP   | 0    | 0  | A1-b |
| ARC-GROSSO | NL   | NP   | 0    | 0  | A1-a |

De acordo com os resultados dos índices físicos do solo natural, sua classificação pelo sistema HRB é do tipo A7-5, um solo predominantemente argiloso que apresentaram comportamento fraco para uso como subleito. Já os agregados ARC-FINO e ARC-GROSSO puros, apresentaram comportamento de materiais arenosos e granulares, onde o sistema de classificação HRB os enquadrrou como A1-b e A1-a respectivamente, com comportamento considerado excelente, predominando em suas composições a pedra britada, pedregulho e areia. Quanto aos índices de consistência, LL e LP, o solo natural apresentou valores expressivos, 61 e 40%, respectivamente, enfatizando seu comportamento argiloso, enquanto para o ARC-FINO e ARC-GROSSO não foi possível determinar tais índices, sendo considerados Não Líquido (NL) e Não Plástico (NP).

As misturas de solo e ARC foram classificadas pelo sistema HRB, antes e depois da aplicação das energias de compactação, normal e modificada, como mostra a Tabela 3.

Tabela 3. Classificação HRB das misturas de solo com agregados

| Materiais            |     | ARC F<br>30 | ARC F<br>50 | ARC F<br>70 | ARC G<br>30 | ARC G<br>50 | ARC G<br>70 |
|----------------------|-----|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Antes<br>Compactação | IG  | 6           | 2           | 0           | 7           | 2           | 0           |
|                      | HRB | A4          | A4          | A2-4        | A4          | A4          | A1-b        |
| Após PN              | IG  | 8           | 3           | 0           | 6           | 2           | 0           |
|                      | HRB | A4          | A4          | A2-4        | A4          | A4          | A2-4        |
| Após PM              | IG  | 1           | 7           | 0           | 7           | 4           | 0           |
|                      | HRB | A4          | A4          | A2-4        | A4          | A4          | A2-4        |

Pode-se observar que o acréscimo de agregado nas misturas de 30 e 50% tanto do ARC-FINO quanto do ARC-GROSSO alterou a classificação do solo de A7-5 para A4, demonstrando uma melhora, porém, tal classificação também foi considerada com comportamento fraco para subleito, tendo característica de solos siltosos. Já para as adições de 70% dos dois agregados, a alteração da classificação foi de um solo fraco para um solo bom, tal comportamento devido ao percentual elevado de agregado com características arenosas, reduzindo a fração de silte e argila da mistura.

Os resultados obtidos no ensaio de granulometria do solo natural, ARC-FINO e ARC-GROSSO estão na Figura 3.

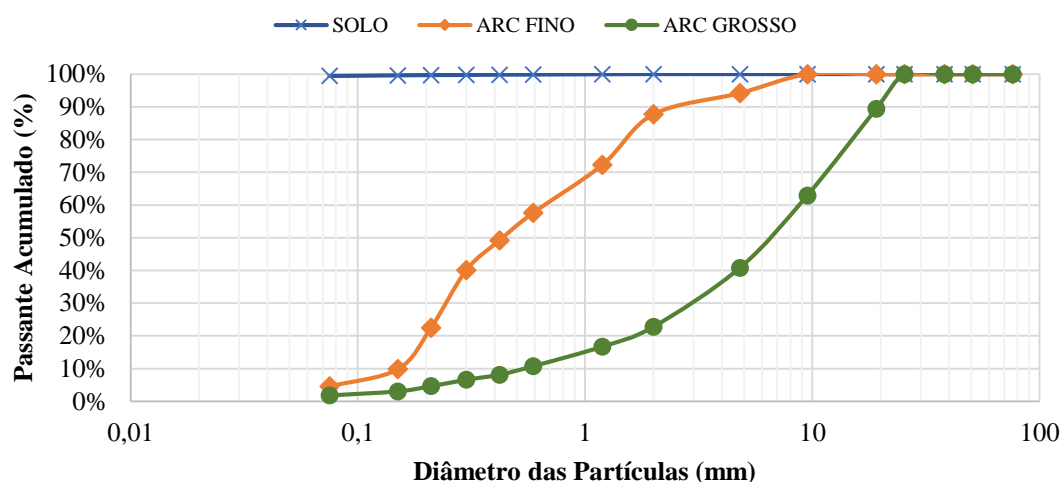


Figura 3. Granulometria dos materiais puros

O solo natural apresenta 99,46% dos grãos passantes na peneira de 0,075mm, sendo, portanto, composto em quase sua totalidade de silte e argila. O ARC-FINO apresenta uma graduação contínua, porém com predomínio de frações de areia fina, média e grossa em sua composição, com os percentuais de 15,37, 37,70 e 30,19%, respectivamente, sendo o maior diâmetro da amostra de 4,8 mm. O ARC-GROSSO apresenta grãos com dimensão máxima de 19,1 mm e uma graduação aparentemente contínua pelo comportamento da curva granulométrica, contudo foi possível verificar a pouca quantidade de material fino presente na amostra, apenas 13,72%, sendo que 86,28% do solo, é composto por pedregulho.

Como mencionado anteriormente, as misturas de solo e agregados foram submetidas ao ensaio de granulometria, antes e depois da compactação PN e PM. A Figura 4 apresenta as granulometrias antes e depois da compactação PN para as misturas de solo e ARC-FINO.

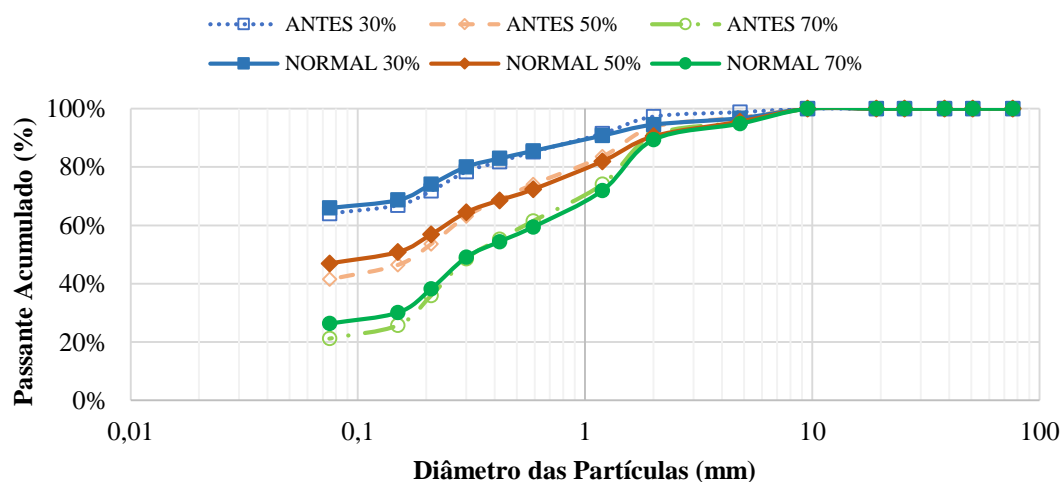


Figura 4. Variação granulométrica do solo com ARC-FINO após compactação PN



Como pode ser observado, todas as misturas com ARC-FINO apresentaram o mesmo comportamento, com um aumento no percentual passante nas frações a partir das partículas com diâmetro menor que 0,50 mm, mostrando que após a compactação, frações do ARC-FINO sofreram desintegração no processo, diminuindo a fração grossa e aumentando a fração fina da composição. Também foi possível observar o comportamento da curva granulométrica entre as misturas que, quanto maior a quantidade de agregado adicionado, menor o percentual de material fino. Enquanto na mistura ARC F 30, o percentual passante na peneira de 0,075mm foi 66%, na mistura ARC F 70, somente 26% de solo passou na mesma peneira.

A Figura 5 apresenta a distribuição granulométrica das misturas de solo e ARC-FINO antes e depois da compactação PM.

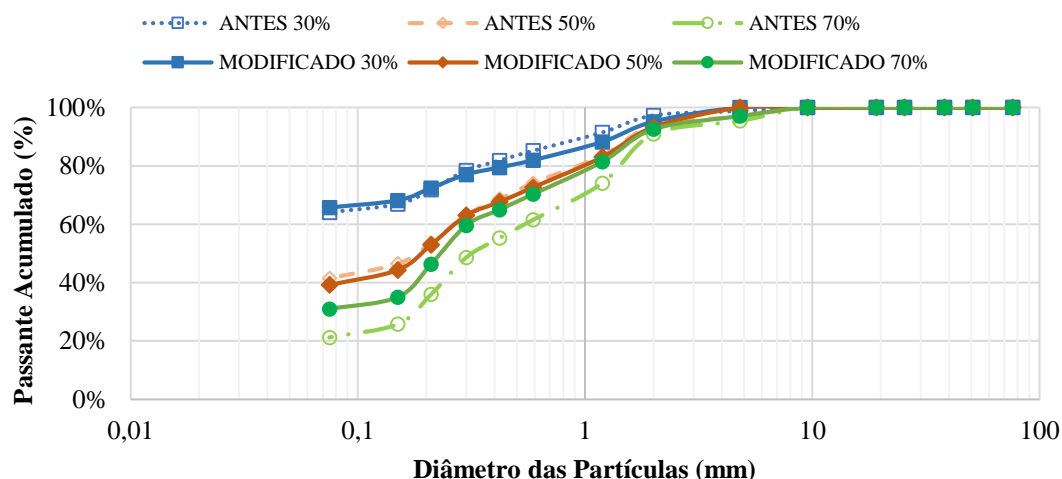


Figura 5. Variação granulométrica do solo com ARC-FINO após compactação na energia PM

O emprego da energia PM, também provocou efeito de redução do tamanho das partículas, sendo que a maior alteração foi constatada na mistura ARC F 70, onde o percentual passante na peneira de 0,075 mm passou de 21% para 31%. Pode-se afirmar com isso que, devido a maior quantidade de agregado na mistura, a influência da compactação, neste caso, se mostra mais efetiva nas partículas de agregado do que no solo, pois essa é a mistura com maior quantidade de agregado.

A Figura 6 apresenta a distribuição granulométrica das misturas de solo e ARC-GROSSO antes e depois da compactação PN.

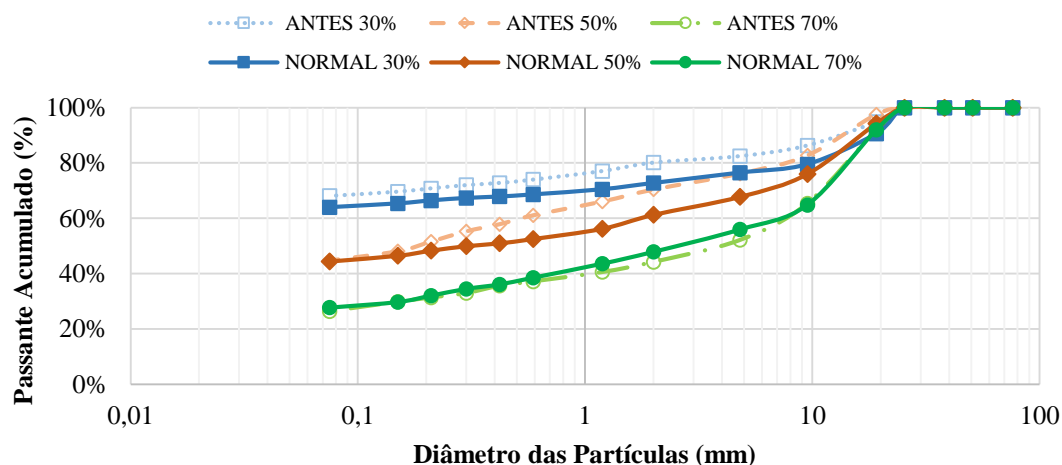


Figura 6. Variação granulométrica do solo com ARC-GROSSO após compactação na energia PN

O ARC-GROSSO após a compactação PN não apresentou um comportamento semelhante às misturas com ARC-FINO, onde era esperada a redução das frações grossas e aumento das frações finas de solo nas amostras com 30 e 50%. Nessas amostras houve redução do percentual passante em todos os diâmetros de partículas. Tal comportamento pode ser explicado pela homogeneidade da mistura, devido as partículas mais grossas de ARC tenderem a segregação, onde no momento da coleta, para os ensaios de granulometria antes da compactação, as amostras podem ter ficado com predominância das frações mais finas de grãos da mistura. No percentual de 70% o comportamento foi diferente, foi possível ver que esse efeito não aconteceu, pois houve um pequeno aumento nas frações de solo menores que 9,5 mm, em média de 4,5%, sendo a degradação pouco significativa.

A Figura 7 apresenta o comportamento das curvas granulométricas do ARC-GROSSO antes e depois da compactação na energia PM.

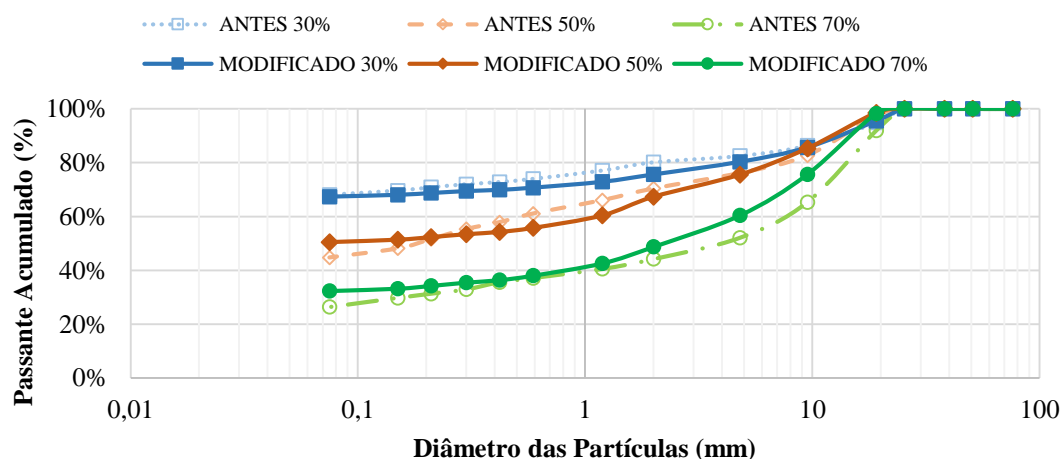


Figura 7. Variação granulométrica do solo com ARC-GROSSO após compactação PM

O emprego da energia PM na alteração da granulometria das misturas apresentou um comportamento semelhante ao da energia PN. Neste, porém, percebeu-se um aumento das frações que passam na peneira 0,075mm para as misturas com 50 e 70%. Na amostra com 70% de ARC-GROSSO, o impacto na redução das partículas foi observado em todos os diâmetros, com uma tendência de quebra mais acentuada nas partículas maiores, com diâmetro entre 1,19 e 19,1mm. Enquanto antes de compactar tinha-se 8,04% de partículas com diâmetro de 19,1mm, após a compactação PM esse percentual caiu para 1,72%,

No ensaio de compactação, foram moldados corpos de prova com cinco teores de umidade para cada mistura e para o solo puro, nas duas energias de compactação para obtenção do teor de umidade ótima. A Figura 8 mostra os resultados de umidade ótima e densidade máxima seca do solo e das misturas de solo e agregados na energia de compactação PN.

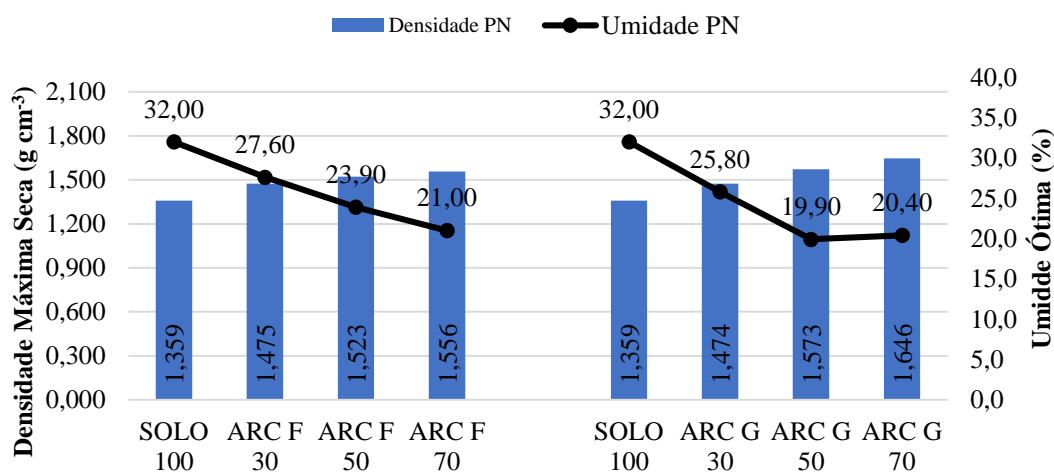


Figura 8. Umidade ótima e densidade máxima seca na energia PN

Foi possível observar que, houve um aumento da densidade máxima conforme o acréscimo de agregado ao solo, em contrapartida, a umidade ótima reduziu com os maiores percentuais de agregados presentes. Obteve-se uma redução de praticamente 35% da umidade ótima do solo puro, em relação as misturas com 70% de ARC. Este comportamento de redução da umidade ótima, conforme aumento dos percentuais de agregado nas misturas, pode ser explicado pela maior presença de material com característica arenosa e de pedregulhos pois, estes materiais normalmente necessitam menor quantidade de água para atingir a umidade ótima de compactação, diferentemente dos solos argilosos que necessitam de maior quantidade de água.

Já o acréscimo da densidade em todas as misturas, pode ser pelo fato de que a adição de agregados provocou um melhor arranjo das partículas, reduzindo o volume de vazios e também por conta de os agregados possuírem maior massa específica, dada sua origem, o concreto. Quanto maior o percentual de agregado na mistura, maior a densidade, principalmente nas misturas com ARC-GROSSO. A maior densidade na energia PN foi obtida na mistura de ARC G 70, atingindo  $1,656 \text{ g cm}^{-3}$ , representando um acréscimo de quase 22% em relação ao solo puro. Esta mistura também foi a que apresentou a menor umidade ótima, com 20,4%, convergindo com as características de solos arenosos.

A Figura 9 ilustra os resultados de umidade ótima e densidade máxima seca do solo e das misturas de solo e agregados na energia de compactação PM.

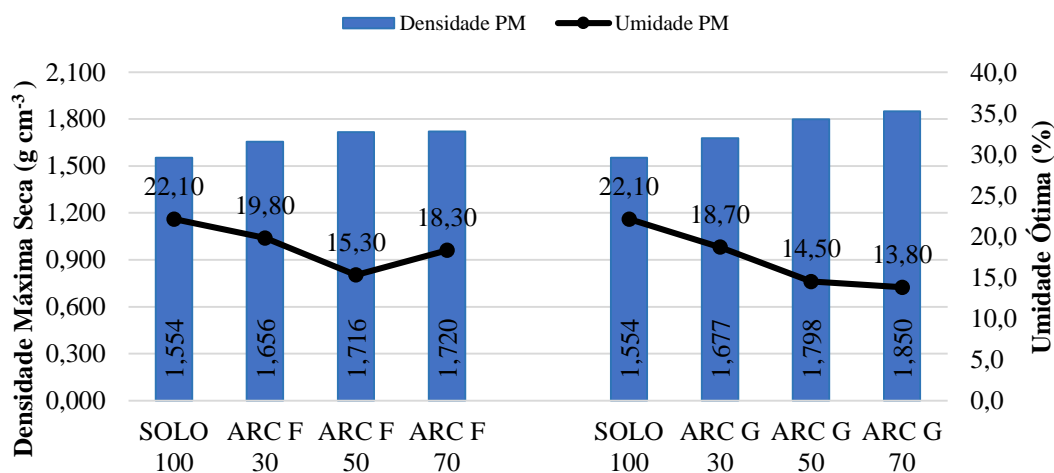


Figura 9. Umidade ótima e densidade máxima seca na energia PM

O comportamento obtido na compactação com energia PM foi semelhante ao apresentado nas misturas compactadas na energia PN: redução da umidade ótima e aumento da densidade conforme aumento dos percentuais de agregado nas misturas. O que pôde ser verificado foi a redução da umidade ótima, de todas as misturas, com a aplicação da energia PM, comparada com a energia PN. Para o solo puro, por exemplo, a umidade passou de 32% na energia PN, para 22% na energia PM, representando uma redução de aproximadamente 30%. Tal efeito é uma característica normal do aumento da energia de compactação, pois necessita menor umidade do solo para expulsão do ar dos vazios e obtenção da maior densidade aparente seca. A amostra ARC G 70 foi a que apresentou menor valor de umidade ótima na energia PM, com 13,80%, uma redução de 32% em relação a mesma amostra na energia PN. No geral, a

redução da umidade ótima das amostras na energia PM em relação a PN ficaram entre 27 e 35%, com exceção, apenas, do ARC F 70, que teve redução de 12,85%.

Com relação a densidade máxima, as amostras apresentaram aumento comparadas com as misturas submetidas a energia PN. Este comportamento evidenciou o fato de que quanto maior a energia aplicada, maior a aproximação entre as partículas, reduzindo ainda mais o volume de vazios do solo. A maior densidade na energia PM também foi obtida na amostra ARC G 70, com  $1,820 \text{ g cm}^{-3}$ , com aumento de quase 10% em relação a mesma amostra com aplicação da energia PN.

O aumento de densidade das amostras submetidas a aplicação da energia PM em relação a energia PN ficou entre 10 e 14%, levando ao entendimento que tiveram praticamente o mesmo ganho com a alteração da energia. Já os ganhos de densidade do ARC-GROSSO em relação ao ARC-FINO, nas duas energias de compactação, atingiram um percentual de mais ou menos 5%, permitindo afirmar que a granulometria tem uma influência pequena nos valores das densidades.

No ensaio de CBR os corpos de prova foram moldados na condição de umidade ótima e densidade máxima seca nas energias de compactação PN e PM. Depois de moldados, os corpos de prova foram levados para um tanque com água, onde ficaram submersos por 96 horas como recomenda a NBR 9895/2016. Passado esse período, foi realizada a leitura da expansão de cada amostra. Na Figura 10 são apresentados os resultados de expansão do solo puro e das misturas, bem como os limites máximos estipulados pelo DNIT, para utilização em camadas de pavimentos, sendo 2, 1 e 0,5% para subleito, sub-base e base, respectivamente.

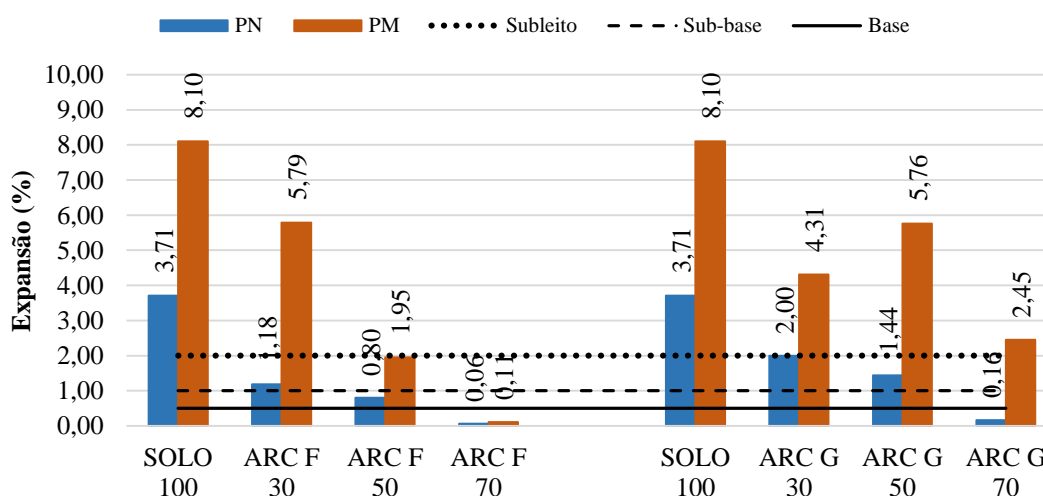


Figura 10. Expansão do solo natural e das misturas de solo com ARC

A expansibilidade é uma característica mais sensível em solos argilosos por terem seu volume ampliado sob o efeito da presença de água. Como mostrado na Figura 10, a expansão é maior no solo puro do que nas misturas, evidenciando que o ARC promoveu de maneira geral, a redução da expansão, característica do comportamento da fração argilosa da mistura. O solo puro, portanto, não pode ser utilizado em camadas de pavimentos, tendo valores de expansão superiores a 2% nas duas energias de compactação.

Na energia de compactação PN houve redução dos valores de expansão para todas as misturas, sendo que o ARC F 70 e o ARC G 70 foram os que apresentaram menores valores de expansão, atingindo 0,06% e 0,16%, respectivamente, com redução de mais de 95% em relação ao solo puro. Nesta energia de compactação, todas as misturas ficam abaixo do limite máximo para utilização como subleito, menores que 2%, sendo para utilização como sub-base a amostra ARC F 50, e para base ARC F 70 e ARC G 70.

Na energia PM, no entanto, os valores de expansão foram maiores que na energia PN, tanto para o solo puro quanto para as misturas, apenas as amostras ARC F 50 e 70, ficaram abaixo de 2%, limite para uso como subleito. O solo puro e as misturas ARC F 30, ARC G 30 e ARC G 50 foram as que mais expandiram com 8,10, 5,79, 4,71 e 5,76% respectivamente. Nas misturas de ARC F 30 e ARC G 30 esse fato pode ter sido influenciado pelo comportamento expansivo do solo natural, sendo que nessas misturas há maior quantidade de solo do que agregado e visto que com o emprego da energia modificada a expansão do solo natural aumentou 54,19% em relação a energia PN. Já no ARC G 50 a expansão pode ter aumentado pela baixa concentração de agregado fino na mistura, não impondo a mesma um comportamento de solo arenoso mais granular e também o ARC pode ter facilitado a penetração da água, o que tornou mais sensível à mistura frente ao efeito expansivo predominante do solo.

O aumento da expansão na energia modificada para todas as misturas e para o solo natural, pode ser atribuído à propriedade do solo argiloso seco sofrer alteração do volume quando em contato com a água. Na compactação com energia PM há um menor volume de vazios e as misturas foram compactadas com menor quantidade de água em relação às amostras compactadas na energia PN. Quando as amostras são colocadas submersas, o solo está mais seco e com menor volume de vazios, estando então mais suscetível a expandir na presença da água, o que não ocorre na compactação PN onde o solo é submerso com uma umidade maior.

A expansão por si só não caracteriza a possibilidade de utilização dos materiais em camadas de pavimentos, é necessário que atendam também aos valores de CBR. O DNIT



estipula que os valores de CBR sejam maiores que 2, 20 e 60% para subleito, sub-base e base, respectivamente. Os valores de CBR obtidos nos ensaios e os limites do DNIT são mostrados na Figura 11.

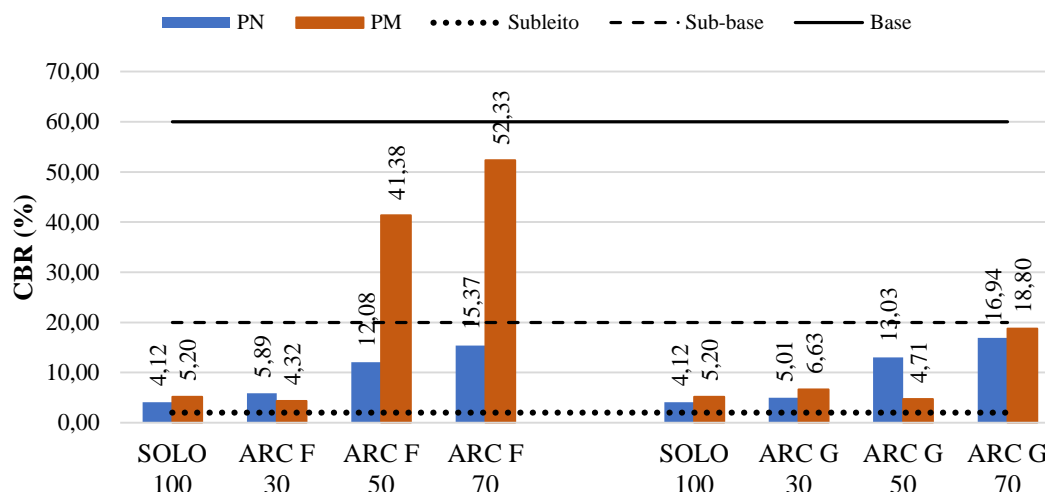


Figura 11. CBR do solo natural e das misturas de solo com ARC

Os valores de CBR obtidos para o solo puro e para as misturas em ambas as energias de compactação, encontram-se acima de 2%, valor necessário para utilização como camada de subleito. Na energia PN os valores de CBR foram semelhantes para as misturas de ARC F e ARC G, evidenciando que nesta energia, a influência da granulometria é pouco significativa nos resultados. No entanto, na energia de compactação PM, observa-se que as misturas de ARC F apresentaram, de maneira geral, valores de CBR superiores aos das misturas ARC G, com exceção do ARC F 30 e do ARC G 50. Nessas misturas, os valores obtidos inferiores aos na energia PN podem estar relacionados com as expansões elevadas que as mesmas apresentaram, onde as frações de agregados de menor dimensão do ARC não conseguiram impor um comportamento de solo arenosos, além da expansão poder ter diminuído a coesão a um nível em que permitiu com que as partículas da mistura tivessem maior mobilidade, diminuindo sua resistência a compressão.

Considerando os valores de expansão mostrados anteriormente, apenas as misturas de ARC F e ARC G compactadas na energia PN e a mistura de ARC F 70 compactada na energia PM, poderiam ser utilizadas como subleito, pois mesmo o solo puro e as demais amostras atingirem valores de CBR superiores a 2%, os valores de expansão estão acima do limite permitido.

Os melhores resultados de CBR foram das amostras ARC F 50 e 70 na energia PM, apresentando um aumento de mais de 70% em relação à energia PN, sendo que, devido à necessidade de atender ao limite de expansão, apenas o ARC F 70 pode ser utilizado como camada de sub-base. Para verificação de quais misturas atenderam os requisitos do DNIT para serem utilizadas em camadas de pavimentos, montou-se a Tabela 4 com os valores de expansão, CBR e as respectivas energias de compactação aplicadas.

Tabela 4. Classificação das amostras para uso em camadas de pavimentos

| <b>Materiais</b> | <b>Energia de Compactação</b> | <b>Expansão %</b> | <b>CBR %</b> | <b>Camada de Pavimento</b>   |
|------------------|-------------------------------|-------------------|--------------|------------------------------|
| SOLO 100         | PN                            | 3,71              | 4,12         | Não se aplica                |
|                  | PM                            | 8,10              | 5,20         | Não se aplica                |
| ARC F 30         | PN                            | 1,18              | 5,89         | Subleito                     |
|                  | PM                            | 5,79              | 4,32         | Não se aplica                |
| ARC F 50         | PN                            | 0,80              | 12,08        | Subleito e Reforço           |
|                  | PM                            | 1,95              | 41,38        | Subleito                     |
| ARC F 70         | PN                            | 0,06              | 15,37        | Subleito e Reforço           |
|                  | PM                            | 0,11              | 52,33        | Subleito, Reforço e Sub-base |
| ARC G 30         | PN                            | 2,00              | 5,01         | Subleito                     |
|                  | PM                            | 4,31              | 6,63         | Não se aplica                |
| ARC G 50         | PN                            | 1,44              | 13,03        | Subleito                     |
|                  | PM                            | 5,76              | 4,71         | Não se aplica                |
| ARC G 70         | PN                            | 0,16              | 16,94        | Subleito e Reforço           |
|                  | PM                            | 2,45              | 18,80        | Não se aplica                |

Comparando os resultados obtidos neste estudo, com os resultados encontrados por Grubba (2009), o qual analisou o comportamento mecânico do ARC puro e de uma mistura com adição de 75% de ARC a 25% de um solo com classificação A 7-5, com compactação em de energia PM, os valores por ele obtidos tanto para o ARC puro quanto para a mistura, possibilitaram o uso dos mesmos como camadas de base e sub-base de pavimentos. A Tabela 5 apresenta os valores do autor comparados a alguns valores deste estudo.

Tabela 5. Umidade ótima, densidade máxima seca, expansão e CBR na energia PM

| <b>Fonte</b>  | <b>Material</b> | <b>Umidade ótima (%)</b> | <b>Densidade máxima seca (g cm<sup>-3</sup>)</b> | <b>Expansão (%)</b> | <b>CBR (%)</b> |
|---------------|-----------------|--------------------------|--------------------------------------------------|---------------------|----------------|
| Grubba (2009) | ARC             | 11,00                    | 1,928                                            | 0                   | 182            |
|               | Solo            | 21,20                    | 1,780                                            | 0,30                | 41             |
|               | ARC-Solo        | 11,50                    | 2,030                                            | 0                   | 164            |
| Este estudo   | Solo            | 22,10                    | 1,554                                            | 8,10                | 5,20           |
|               | ARC F 70        | 18,30                    | 1,720                                            | 0,11                | 52,33          |
|               | ARC G 70        | 13,80                    | 1,850                                            | 2,45                | 18,80          |

Os valores de expansão e CBR do solo natural obtidos pelo autor são bem diferentes dos valores do solo natural encontrados nesse estudo, 0,30 e 41% do autor contra 8,10 e 5,20%,

para expansão e CBR, respectivamente. Com isso é possível afirmar que, apesar da classificação HRB do solo utilizado pelo autor ser a mesma, A 7-5, as composições de cada solo são diferentes, condicionando a obtenção de melhores resultados de estabilização de solo com adição de ARC ao tipo do solo.

## Conclusões

As propriedades do solo natural obtidas nos resultados dos ensaios físicos e mecânicos, confirmam que ele não pode ser utilizado como subleito de fundação em obras de pavimentação, enfatizando a necessidade de reforço, substituição ou estabilização, sendo esta última a proposta deste estudo para que o mesmo pudesse ser aproveitado.

A adição de ARC-FINO e ARC-GROSSO ao solo da Formação Geológica Palermo provocou efeitos positivos nos resultados de expansão e CBR, permitindo afirmar que as frações dos ARCs, possibilitaram um melhor arranjo das partículas nas misturas, melhorando a graduação do solo predominantemente argiloso e impondo a este um comportamento característico de solo arenoso.

Verificou-se por meio do comportamento das curvas granulométricas das misturas, que o processo de compactação provoca a quebra das partículas maiores do ARC alterando sua granulometria, isso decorrente da elevada variação das resistências dos concretos e argamassas presentes no ARC, evidenciando a necessidade de um maior controle, com a previsão das alterações frente ao comportamento das misturas utilizadas.

Houve redução da expansão conforme a quantidade de ARC adicionada ao solo, evidenciada pela sua composição arenosa, em que todas as misturas resultaram em expansões menores que a do solo natural, tanto na energia PN quanto na PM, com destaque para a amostra ARC F 70 com valores abaixo de 0,20%.

As adições que apresentaram valores de CBR e expansão dentro dos limites do DNIT, para utilização em camadas de pavimentos para subleito foram: todas as misturas compactadas na energia PN e ARC F 50 e 70 compactadas na energia PM; para Reforço do Subleito: ARC F 50 e 70 e ARC G 70 compactadas na energia PN e ARC F 70 compactada na energia PM; para Sub-base: ARC F 70 compactada na energia PM. Nenhuma mistura atingiu os valores mínimos para utilização como base.

Conclui-se que o tamanho das partículas dos ARCs interferem nos resultados, visto que as misturas com ARC-FINO apresentaram bons resultados de expansão e CBR tanto na energia PN quanto PM. Em contrapartida, as misturas com ARC-GROSSO somente apresentaram resultados positivos de expansão quando compactadas na energia PN, sendo que todas as misturas dessa granulometria compactadas em PM resultaram em valores de expansão acima de 2%, limite para subleito, permitindo afirmar que as frações finas dos agregados é que são responsáveis pela melhora do comportamento argiloso do solo.

Com isso é possível afirmar que a utilização do ARC é uma alternativa viável para estabilização de solos argilosos, fornecendo um destino sustentável a este tipo de resíduo com propriedades inertes, evitando seu descarte irregular e diminuindo os impactos ambientais, principalmente pela possibilidade de redução de extração de agregados naturais.

Como recomendação para trabalhos futuros sugere-se:

- ✓ Estabilização granulométrica com a adição de ARCs em outros tipos de formação de solos;
- ✓ Estabilização granulométrica em solos da Formação Geológica Palermo utilizando uma composição granulométrica de ARC dentro das faixas estipuladas pelo DNIT, juntamente com a associação com aglomerantes do tipo cal ou cimento.

## Referências bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457:** Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459:** Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180:** Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181:** Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182:** Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9895:** Solo – Índice de Suporte Califórnia. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004:** Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15115:** Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15116:** Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos. Rio de Janeiro, 2004.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução Conama nº 307, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. **Diário Oficial da União**, Brasília, 17 jul. 2002.

BRESCIANI, Denise. **Análise das propriedades físicas e mecânicas de um solo da Formação palermo, estabilizado com aditivo perma zyme®.** 2009. 153 f. TCC (Curso de Engenharia Civil) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2009.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO - CBIC. **Reaproveitamento de resíduos é saída para melhorar competitividade.** Disponível em: <<https://cbic.org.br/reaproveitamento-de-residuos-e-saida-para-melhorar-competitividade/>>. Acesso em: 17 mar. 2018.

CARDOSO, A. C. F.; GALATTO, S. L.; GUADAGNIN, M. R. Estimativa de Geração de Resíduos da Construção Civil e Estudo de Viabilidade de Usina de Triagem e Reciclagem. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, Rio de Janeiro, v. 31, n. 31, p.1-10, mar. 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES. **DNIT 141: Pavimentação** – Base estabilizada granulometricamente – especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação.** 3 ed. Rio de Janeiro, 2006.

FIROOZI, A. A. et al. Fundamentals of soil stabilization. **International Journal of Geo-Engineering**. nov, 2017.

GRUBBA, David Christian Regis Pereira. **Estudo do comportamento mecânico de um agregado reciclado de concreto para utilização na construção rodoviária.** 2009. 163 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

INSTITUTO DE PESQUISAS ECONÔMICAS APLICADAS - IPEA. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Construção Civil.** Brasília, 2012.

LEITE, F. C. **Comportamento mecânico de agregado reciclado de resíduos sólidos da construção civil em camadas de base e sub-base de pavimentos.** 2007. 216 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.